Die Dauerstandfestigkeit von Baustahl und ihre rationelle Ermittlung

Von der
Technischen Hochschule zu BRESLAU
zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

Dissertation.

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Hubert Juretzek
aus Kochlowitz

Referent:
Prof. Dr. phil. Sauerwald

Korreferent:
Prof. E. Diepschlag

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Juli 1933

Es ist mir eine angenehme Pflicht, den Herren Hüttendirektor FRITZ GORSCHLÜTER und Dr.-Ing. ERNST POHL, denen ich die Anregung zu vorliegenden Untersuchungen verdanke, an dieser Stelle meinen verbindlichsten Dank auszusprechen. Ferner danke ich Herrn Professor Dr. SAUERWALD für das freundliche Entgegenkommen und die Unterstützung bei Vervollständigung und Nachprüfung der Untersuchungen in dem Dauerstandfestigkeitslaboratorium des Lehrstuhls für Metallkunde an der Technischen Hochschule in Breslau.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

ERSCHEINT AUCH IN „DIE WÄRME", HEFT 17, SEITE 267—273, APRIL 1934

Beschreibung der Versuchsstoffe und Versuchsdurchführung. Dauerstandversuche von mehreren hundert Stunden bei 400, 500 und 550 °. Vorschlag einer neuen, an den physikalischen Vorgang anknüpfenden Begriffsfestsetzung der Dauerstandfestigkeit. Nachweis seiner Berechtigung an Hand der eigenen Versuchsergebnisse und der des Schrifttums. Vereinfachtes Ermittlungsverfahren der nach dem neuen Vorschlag festgesetzten Dauerstandfestigkeit durch stufenweise Steigerung der Belastung nur eines Probestabes.

Die natürliche Begriffsbestimmung der Dauerstandfestigkeit ist folgende: Die Dauerstandfestigkeit ist die Grenzbelastung, die ein Werkstoff bei statischer Dauerbeanspruchung nach einem anfänglich auftretenden, im Laufe der Zeit aber zum Stillstand kommenden Fließen dauernd ertragen kann, oberhalb welcher dagegen eine dauernde Verformung allmählich bis zum Eintritt des Bruches erfolgt. Versuche nach diesem Verfahren ergaben große Schwierigkeiten, da das Zuruhekommen des Fließens schwer festzustellen ist und die Beobachtungszeiten ungebührlich lang werden. Infolge dieser Schwierigkeiten müssen Vereinbarungen über geringe, am Ende des Versuches zulässige Dehngeschwindigkeiten getroffen werden, wobei auch die Gesamtverformung, bei der das Fließen annähernd zum Stillstand kommt, zu beachten sein wird. Auf diese Weise genügt man immerhin noch dem natürlichen Begriff; man ist jedoch vollständig auf vereinbarte Festsetzungen angewiesen, sobald man einen Näherungswert der Dauerstandfestigkeit aus abgekürzten Versuchen über beschränkte Zeiten ermitteln will. Hier werden als Begriffsbestimmung gewisse willkürlich festgelegte Beträge der Dehngeschwindigkeiten innerhalb bestimmter Zeiten zugrunde gelegt. Demgegenüber die wahre Dauerstandfestigkeit ohne Vereinbarung zu finden und gleichzeitig das Ermittlungsverfahren einfach zu gestalten, ist vor allem Ziel der vorliegenden Arbeit[1]).

Versuchsstoffe

Die Versuchsstoffe bildeten sieben Baustahlsorten. Ihre chemische Zusammensetzung ist in Tafel 1 wiedergegeben. Die Werkstoffe A bis C entsprechen den Blechsorten I bis III der Werkstoff- und Bauvorschriften für Landdampfkessel. Der Werkstoff D stellt einen Sonderstahl mit einem hohen Mangan- und Silizium-, jedoch geringen Molybdängehalt dar. Werkstoff E ist mit Molybdän und wenig Vanadin legiert. Sämtliche Werkstoffe A bis E wurden aus 20 mm dicken Blechen ohne Verletzung der Walzhaut herausgearbeitet. Die Werkstoffe F und G sind Stahlgußsorten. F entspricht dem Stahlguß I der genannten Vorschriften, G einem Stahlguß nach DIN 1681 mit mindestens 50 kg/mm² Festigkeit. Die Versuchsproben aus Stahlguß waren Rundstäbe. Sämtliche Stäbe wurden in der Form des Langstabes nach DIN mit 200 mm Meßlänge hergestellt. Alle Werkstoffe wurden vor den Versuchen normal geglüht.

Tafel 1. Chemische Zusammensetzung der untersuchten Stahlsorten

Bezeichnung des Werkstoffes	C	P	Mn	S	Si	Cu	Mo	V
A	0,115	0,038	0,48	0,040	—	—	—	—
B	0,17	0,017	0,49	0,033	—	—	—	—
C	0,28	0,029	0,52	0,035	—	—	—	—
D	0,165	0,038	1,06	0,030	0,88	0,38	0,049	—
E	0,155	0,015	0,50	0,020	—	—	0,34	0,014
F	0,11	0,036	0,52	0,042	0,22	—	—	—
G	0,30	0,019	0,64	0,032	0,41	—	—	—

Versuchsdurchführung

Diese erfolgte mit einer früher beschriebenen Einrichtung[2]). Die Temperaturen waren 400, 500 und 550 °. Für ihre Wahl war die in den letzten Jahren gewonnene Erkenntnis maßgebend, daß unterhalb 350 ° bei nichtlegierten Stählen und 450 ° bei legierten die Dauerstandfestigkeit praktisch bedeutungslos ist, da sie oberhalb der Warmstreckgrenze bzw. der 0,2 %-Grenze liegt[3]). Zur Vermeidung unzulässig hoher Formänderungen bildet daher nur letztere eine Grundlage für die Bewertung der Werkstoffe und der zulässigen Spannungen, während in dem Bereich der Versuchstemperaturen und darüber hinaus nur die Dauerstand-

[1]) Eine Bearbeitung des in- und ausländischen Schrifttums ist in den grundlegenden Arbeiten des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Eisenforschung in Düsseldorf enthalten. Vgl. A. Pomp und A. Dahmen, 9 (1927), S. 33; A. Pomp und W. Enders, 12 (1930), S. 127/147; A. Pomp und W. Höger, 14 (1932), S. 37/57. Von den in vorstehenden Berichten noch nicht aufgeführten Arbeiten sind zu nennen: W. Rohn, Z. Metallkde., 24 (1932), S. 127/31; E. Siebel und M. Ulrichs, Z. VDI, 76 (1932), S. 659/63.

[2]) E. Pohl, H. Scholz und H. Juretzek, Arch. Eisenhüttenwes., 4 (1930/31), S. 105/110.

[3]) F. Körber und A. Pomp, Stahl u. Eisen, 52 (1932), S. 553 bis 559

festigkeit von Bedeutung ist. Es wurden Langzeitversuche mit verschiedenen konstanten Belastungen unter Verwendung immer neuer Probestäbe wie folgt unternommen: Der Probestab wurde im unbelasteten Zustande auf die Versuchstemperatur erhitzt und diese zur gleichmäßigen Durchwärmung drei Stunden im Luftbad konstant gehalten. (Versuche im Salzbad lieferten das gleiche Ergebnis.) Dann wurde eine bestimmte Belastung hergestellt und der sich sofort einstellende Dehnbetrag abgelesen. Der Stab blieb mehrere hundert Stunden dieser Belastung ausgesetzt, wobei stündlich die Dehnung abgelesen wurde. Nach Beendigung des Versuches wurde entlastet und der Betrag, um den die Längung zurückging, als elastische Dehnung festgestellt. Weiterhin wurden noch Versuche mit stufenweiser Belastung durchgeführt.

Langzeitversuche

Sämtliche Versuche unter Verwendung eines immer neuen Probestabes und konstanter Belastung enthält Tafel 2. Bei der Bewertung der Ergebnisse stößt man auf die oben angedeuteten Schwierigkeiten. Wird doch das Bestehen einer wahren Dauerstandfestigkeit, d. h. ein Abklingen der Dehngeschwindigkeit auf den Wert Null, von vielen Forschern überhaupt bestritten[1]). Da ein Nachweis der einen oder anderen Behauptung kaum zu erbringen sein dürfte, ergibt sich die Notwendigkeit, eine geringe Dehngeschwindigkeit auch bei praktischer Dauerstandfestigkeit noch zuzulassen. Welcher Betrag als zulässig gelten kann, steht gleichfalls noch nicht einheitlich fest. Von A. Pomp und W. Höger wird ein Werkstoff als praktisch dauerstandfest angenommen, wenn die Dehngeschwindigkeit im Laufe des Versuches den Betrag von höchstens 1×10^{-4} % je Stunde erreicht. Dieser Betrag ist auch von anderen deutschen Forschern sowie im ausländischen Schrifttum[4]) und bei den vorliegenden Versuchen festgesetzt. In Tafel 2 sind die Belastungen, bei denen demnach der Werkstoff noch dauerstandfest ist, fett gedruckt. Zu den Ergebnissen ist noch folgendes zu bemerken:

Die Verlängerung, die der Probestab bei Wirksamwerden der Belastung sofort, innerhalb weniger Sekunden, erfährt, ist mitunter weit größer als die nach dem Entlasten festgestellte elastische Dehnung. In diesen Fällen hat der Werkstoff sofort eine bleibende Verformung aufgenommen, auf die dann erst die langsame, „kriechende" Dehnung folgt. Zweifellos ist diese Erscheinung für das gesamte Verhalten des Werkstoffes bei Dauerbeanspruchung von Einfluß und mit physikalischen Vorgängen im Werkstoff (Verfestigung und Entfestigung) verknüpft.

[4]) R. W. Bailey, Engineer, 148 (1929), S. 528/29; auch Engineering, 129 (1930), S. 265/66 und S. 327/29.

Tafel 2. Ergebnisse der Dauerbelastungsversuche

Versuchstemperatur	Belastung	Sofort auftretende Anfangsdehnung		Dehngeschwindigkeiten der letzten Stunden des Versuchs	Dehnung nach dem Versuch			Gesamte Versuchsdauer
		gesamte	bleibende		gesamte	Meßlänge elastische	bleibende	
°C	kg/mm²	%	%	10^{-4} %/h	%	%	%	Stunden
		Werkstoff A						
400	**3,0**	0,017	0	0	0,0225	0,02	0,0025	67
400	**5,0**	0,019	0	0,4	0,0495	0,0305	0,019	178
400	**10,0**	0,103	0,043	0,7	0,155	0,06	0,095	209
400	12,0	0,1615	0,0995	2,0	0,332	0,062	0,27	300
400	14,0	0,191	0,105	7,0	0,699	0,086	0,613	494,5
500	**3,1**	0,018	0	0,4	0,038	0,021	0,017	199,5
500	4,0	0,028	0,004	1,6	0,144	0,024	0,12	200
500	5,0	0,0405	0,005	8,0	0,3705	0,0355	0,335	175
500	6,1	0,039	—	25,0	2,0	—	—	300
550	2,0	0,015	0	3,0	0,215	0,015	0.2	336
550	3,0	0,020	0	23,0	0,4575	0,02	0,4375	150
		Werkstoff B						
400	**9,0**	0,075	0,017	0,6	0,162	0,058	0,104	280
400	10,0	0,12	0,0555	1,3	0,264	0,0645	0,1995	450
400	12,2	0,15	0,075	1,8	0,3295	0,075	0,2545	513
500	**3,2**	0,04	0,0165	0,9	0,115	0,0235	0,0915	295
500	4,0	0,0350	0,005	7,0	0,2975	0,03	0,2675	360
550	2,0	0,0055	0	2,3	0,165	0,016	0,149	480
550	3,0	0,012	0	16,0	0,464	0,024	0,44	217
		Werkstoff C						
400	**12,0**	0,076	0	0,9	0,1265	0,076	0,0505	123
400	14,0	0,165	0,0775	1,4	0,3885	0,0875	0,231	510
500	**7,0**	0,04	0	0,8	0,1135	0,051	0,0625	199,5
500	9,0	0,06	0	30,0	1,131	0.06	1,071	242
550	3,0	0,03	0,0070	2,5	0,195	0,023	0,172	540
550	4,0	0,0345	0,0085	32,0	1,0615	0,026	1,0355	240
550	6,0	0,044	0	88,0	1,6705	0,047	1,6235	160
		Werkstoff D						
400	**20,0**	0,12	0,0065	0,2	0,1425	0,1135	0.029	303
400	**24,0**	0,239	0,108	1,0	0,325	0,13I	0,194	209
400	**26,0**	0,31	0,167	1,0	0,4475	0,143	0,3045	200
500	**12,0**	0,05	0	1,0	0,175	0,076	0,099	224
500	14,0	0,104	0,012	25,0	0,4495	0,092	0,3575	110
500	18,0	0,093	0	175,0	0,6745	0,11	0,5645	40
550	**6,0**	0,045	0,0043	1,0	0,135	0,0407	0,0943	140
550	8,0	0,079	0,0245	8,5	0,355	0,0545	0,3005	265
		Werkstoff E						
550	**9,0**	0,0825	0,0215	0,8	0,1335	0,061	0,0725	180
		Werkstoff F						
400	**10,0**	0,05	0	1,0	0,115	0,0537	0,0613	150
400	12,0	0,066	0,001	7,0	0,1875	0,065	0,1225	130
500	**7.0**	0,1075	0,0678	0,3	0,14	0,0397	0,1003	180
500	9,0	0,096	0,0445	13,0	0,395	0,0515	0,3435	140
550	**4,0**	0,04	0,0155	0,7	0,0825	0,0245	0,058	210
550	6,0	0,135	0,096	83,0	0,575	0,039	0,536	34
		Werkstoff G						
400	**13,0**	0,081	0,003	0,3	0,1625	0,078	0,0845	140
400	16,0	0,135	0,0455	5,0	0,28	0,0895	0,1905	220
500	**8,0**	0,0955	0,048	1,0	0,232	0,0475	0,1845	240
500	10,0	0,055	0	15,0	0,524	0,0595	0,4645	214
550	**5,0**	0,035	0,003	1,2	0,105	0,032	0,073	100
550	6,0	0,04	0,0015	32 0	0,495	0,0385	0,4565	144

Ein bemerkenswerter Unterschied in dem Verlauf der Zeitdehnungsschaulinien wurde bei den Werkstoffen A, B und C bei 550 ° festgestellt. Eine über den elastischen Betrag hinausgehende Anfangsdehnung wurde hier im Gegensatz zu den Versuchen bei den darunterliegenden Temperaturen nicht beobachtet, vielmehr setzte auch bei der niedrigen Belastung von 2 kg/mm² von Anfang an ein gleichmäßiges Fließen mit gleichbleibender oder nur wenig abnehmender Geschwindigkeit ein. Es ist zu vermuten, daß bei dieser Temperatur auch noch geringere Belastungen gleichfalls ein ständiges Fließen hervorrufen und eine Dauerstandfestigkeit überhaupt nicht mehr besteht. Den gleichen Verlauf der Zeitdehnungslinie mit fast gradlinigem Anstieg und stets gleichbleibender Dehngeschwindigkeit haben A. Pomp und W. Höger [1]) an einem Chrom-Nickel-Vergütungsstahl schon bei Temperaturen von 400 und 500 ° festgestellt. Er wurde damit erklärt, daß hier im Laufe der langen Erhitzungszeit ein Fortschreiten der Anlaßwirkung verbunden mit einer Verminderung des Fließwiderstandes eintritt. Es wäre möglich, daß das gleiche Verhalten bei den vorliegenden Versuchen ebenfalls mit fortschreitenden Gefügeänderungen (Rekristallisation) zusammenhängt.

Bei den anderen Temperaturen liegt bei Werkstoff B trotz des höheren Kohlenstoffgehalts die Dauerstandfestigkeit etwas niedriger als bei A, während C die höchsten Werte aufweist.

Gegenüber diesen drei Kesselblechsorten besitzt der legierte Stahl bei allen Temperaturen eine erheblich höhere Dauerstandfestigkeit.

Der Sonderstahl E (Molybdängehalt 0,34 %) zeigt bei 550 ° noch eine hohe Dauerstandfestigkeit von über 9 kg/mm². Die Werte bei tieferen Temperaturen wurden bereits früher ermittelt [2]). In der Ueberlegenheit prägt sich der Gehalt an Molybdän aus, dessen Wirkung aus dem Schrifttum der letzten Jahre bekannt ist.

Der Stahlguß F zeigt bei 400 ° etwa das gleiche Verhalten wie A, während bei höheren Temperaturen der Abfall der Widerstandsfähigkeit wesentlich geringer ist, was vor allem auf den Siliziumgehalt zurückzuführen ist. Stahlguß G zeigt bei allen Temperaturen eine höhere Widerstandsfähigkeit als F.

Zeitdehnungsschaulinien in logarithmischer Darstellung

Im Schrifttum spielt häufig die Darstellung der Zeitdehnungslinien im logarithmischen Verfahren eine Rolle [5])[6]). **Abb. 1** zeigt für A bei 400 ° die Dehnungslinien in doppellogarithmischer Darstellung. Bei 3 kg/mm² verläuft die Dehnungslinie fast parallel zur Zeitachse, d. h. eine meßbare Zunahme der Dehnung tritt nicht ein. Bei Steigerung der Belastung ist anfänglich eine Wölbung der Schaulinie festzustellen, die aber auch bald in eine Parallele zur Zeitachse übergeht. Die zunächst zunehmende Dehnung kommt allmählich zum Stillstand. Bei weiterer Laststeigerung nimmt die Länge des gewölbten Teiles der Schaulinie zu, d. h. der Bereich zunehmender Dehnung umfaßt einen längeren Zeitraum, die Wölbung wird aber immer flacher und geht schließlich annähernd in eine Gerade über (10 kg/mm²). Bei noch höherer Belastung besteht die Schaulinie nur anfangs aus einer Geraden und ist am Ende nach der entgegengesetzten Seite der Dehnungsachse gewölbt. Diese Wölbung entspricht einer sehr raschen Zunahme der Dehnung. Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß die zur Zeitachse gewölbten Linien den Bereich der wahren Dauerstandfestigkeit darstellen, während die zur Dehnungsachse gewölbten Linien den Bereich des ständigen Fließens kennzeichnen.

[5]) Dissertation Eckardt, 1929, Technische Hochschule Aachen.
[6]) E. Siebel und M. Ulrich, Z. VDI, 76 (1932), S. 659/63.

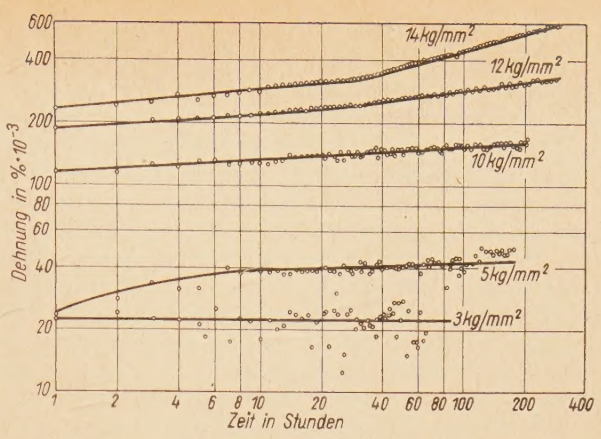

Abb. 1. Zeitdehnungslinien in logarithmischer Darstellung (Werkstoff A. 400 °)

Dauerstandfestigkeit und Abhängigkeit der Dehngeschwindigkeiten von der Belastung

Die bisherigen Verfahren, aus Kurzversuchen einen Näherungswert für die wahre Dauerstandfestigkeit zu ermitteln, beruhen auf vereinbarten Festsetzungen bestimmter Dehngeschwindigkeiten in den ersten Stunden. So soll nach den Vorschlägen des Eisenforschungsinstituts [1]) die Dauerstandfestigkeit dann als erreicht angesehen werden, wenn die Dehngeschwindigkeit in der dritten bis sechsten Stunde nach Lastaufgabe 0,005 % je Stunde, in der fünften bis zehnten Stunde 0,003 % je Stunde und in der 25. bis 30. Stunde 0,0015 % je Stunde beträgt.

Demgegenüber soll nun eine Erscheinung zur Begriffsbestimmung der Dauerstandfestigkeit herangezogen werden, die sich ohne vereinbarte Festsetzungen innerhalb kurzer Zeit feststellen läßt.

Aus den Langzeitversuchen mit A bei 400 ° sind die Dehngeschwindigkeiten der 3. bis 6., 5. bis 10. und 25. bis 30. Stunde und außerdem noch die der ersten Stunde und der 100. bis 200. Stunde ermittelt worden (Tafel 3, **Abb. 2**). Die Dehnungslinien steigen zunächst steil an, die Dehngeschwindigkeit nimmt also mit der Belastung nur wenig zu. Bald aber entfernen sich die Schaulinien mehr und mehr von der Achse der Belastung, d. h. oberhalb einer gewissen Belastung verläuft die Verformung nach einem we-

Tafel 3. Zusammenstellung der aus den Langzeitversuchen mit Werkstoff A bei 400° ermittelten Dehngeschwindigkeiten in verschiedenen Zeitabschnitten

Belastung kg/mm²	Dehngeschwindigkeiten in % × 10⁻⁴/h				
	1. h	3.—6. h	5.—10. h	25.—35. h	100.—200. h
3	60,0	0	0	0	0
5	40,0	11,66	5	0,5	0,15
10	125,0	16,6	13	2,5	0,75
12	255,0	33,3	23	10,0	2,75
14	545,0	66,0	40	20,0	10,0

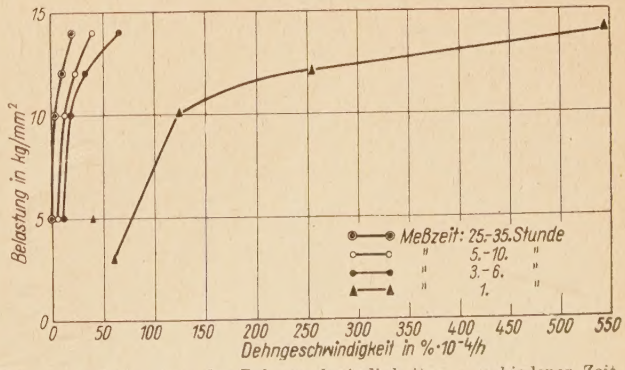

Abb. 2. Abhängigkeit der Dehngeschwindigkeiten verschiedener Zeitabschnitte von der Belastung. (Werkstoff A. 400 °)

sentlich anderen Gesetz als unterhalb. Ueberraschend deutlich kommt dies in der doppellogarithmischen Darstellung zum Ausdruck (Abb. 3). Die Linien werden in zwei Geraden zerlegt, deren Schnittpunkt den ausgezeichneten Belastungswert darstellt. Diese mathematische Analyse würde die Funktion $y = m \cdot x^n$ ergeben, wobei die Konstanten m und n bei dem ausgezeichneten Punkt andere Werte annehmen. Diese Funktion hatten bereits Norton[7]) und auch andere Forscher aufgestellt, ohne aber auf die Unstetigkeit und ihre Bedeutung einzugehen. Es ist auch nicht gesagt, daß die Linien nach der genannten Funktion verlaufen. Auch die Darstellung als e-Funktion und als Potenzreihe ergab das gleiche Bild und den Unstetigkeitspunkt bei der gleichen Belastung. Wichtig ist nur, daß jede dieser Darstellungen zwei verschiedene analytische Funktionen ergibt.

Welche Bedeutung dem Unstetigkeitspunkt zukommt, geht aus den Werten der Dehngeschwindigkeiten zwischen der 100. und 200. Stunde hervor, die das Verhalten bei länger dauernder Beanspruchung kennzeichnen. Sie betragen bei Belastungen bis zu dem Unstetigkeitspunkt noch nicht 1×10^{-4} % je Stunde, während sie oberhalb desselben diesen Wert stark überschreiten. Daraus dürfte sich die Berechtigung ergeben — und das ist der neue Vorschlag —, den Unstetigkeitspunkt mit der Dauerstandfestigkeit in Beziehung zu bringen. Stellt doch auch physikalisch der Unstetigkeitswert als Endpunkt des ersten Belastungsbereiches den Grenzwert dar, bis zu dem niedrige Dehngeschwindigkeiten auftreten. Es ist demnach kein Zufall, daß schon nach etwa 200 Stunden bei Belastungen bis zu dem Unstetigkeitspunkt Dehngeschwindigkeiten auftreten, die unterhalb des erfahrungsgemäß festgesetzten Wertes für die Dauerstandfestigkeit von 1×10^{-4} % je Stunde liegen, während sie bei Belastungen oberhalb des Unstetigkeitspunktes diesen Wert auch nach längeren Zeiten weit überschreiten. Offenbar kommt in dem Verlauf der Dehngeschwindigkeitslinie bis zu dem Unstetigkeitspunkt die Eigenschaft des Werkstoffes zum Ausdruck, die als praktische Dauerstandfestigkeit gilt. Nach **Abb. 3** liegt ferner der Unstetigkeitspunkt bei allen Linien bei der gleichen Belastung. Das bedeutet, daß die gefundene Abhängigkeit der Dehngeschwindigkeit von der Belastung bei jeder beliebigen Meßzeit, auch bereits in der ersten Stunde, vorhanden ist. Danach trennt der Unstetigkeitspunkt die kleinen Dehngeschwindigkeiten von den größeren durch alle Zeiten hindurch, was gleichfalls dazu führt, den Unstetigkeitspunkt als eine neue Begriffsbestimmung für die Dauerstandfestigkeit zugrunde zu legen. Damit würden Versuche von jeweils einstündiger oder vielleicht noch geringerer Dauer genügen. Praktisch werden sich allerdings Versuche von drei- bis sechsstündiger Dauer empfehlen, um Zufälligkeiten auszuschalten und eine Prüfmöglichkeit durch mehrere Linien verschiedener Meßzeiten zu haben.

[7]) F. H. Norton, The Creep of steel at high Temperatures. London, Mc. Graw-Hill Publishing Co. Ltd., 1929.

Nach dem vom Eisenforschungsinstitut vorgeschlagenen Abkürzungsverfahren würde sich 13,2 kg/mm² als praktische Dauerstandfestigkeit für A bei 400 ° ergeben (Abb. 2). Dieser Wert liegt oberhalb des Unstetigkeitspunktes (10 kg/mm²). Tatsächlich ist auch nach den Langzeitversuchen mit 12 und 14 kg/mm² Belastung die praktische Dauerstandfestigkeit bei 13 kg/mm² bereits überschritten.

Die Zahl der mit den anderen Werkstoffen durchgeführten Langzeitversuche reicht leider nicht aus, um die dargelegte Gesetzmäßigkeit zu beweisen. Der weitere Nachweis soll daher an Ergebnissen im Schrifttum geführt werden.

In Tafel 4 ist eine große Zahl von Dauerstandversuchen ausgewertet. Es sind angegeben: die nach dem neuen Vorschlag ermittelten Unstetigkeitspunkte, und zwar sowohl die unmittelbar an den nichtlogarithmischen Linien abgelesenen, als auch die aus der logarithmischen Darstellung ermittelten, ferner die Dauerstandfestigkeit aus Langzeitversuchen sowie nach dem Abkürzungsverfahren des Eisenforschungsinstituts. Bevorzugt sind solche Versuche, die auch Angaben über Langzeitversuche enthielten und bei denen möglichst viele Laststufen untersucht wurden. Die Auswertung wird an drei verschiedenen Stahlsorten durch **Abb. 4** und **5** veranschaulicht. In den untersuchten 15 Fällen, wo Langzeitversuche vorlagen, ist zehnmal praktische Uebereinstimmung zwischen der Last am Unstetigkeitspunkt und der im Langzeitversuch festgestellten Dauerstandfestigkeit vorhanden, viermal ist ein Widerspruch zwischen beiden Werten nicht vorhanden, da hier nur obere Grenzwerte für das Ergebnis des Langzeitversuches zu ermitteln waren. Einmal ist der ermittelte Wert 1 bis 2 kg/mm² kleiner als nach dem Langzeitversuch. In allen untersuchten Fällen besteht zwanzigmal Uebereinstimmung mit den Werten nach dem Pomp-Endersschen Vorschlag, elfmal nicht. Von den nicht übereinstimmenden Versuchen müssen fünf ausgeschieden werden, weil die Dauerstandfestigkeit oberhalb der Fließgrenze (0,2 %) liegt, praktisch also bedeutungslos ist, zwei, weil die im Abkürzungsverfahren nach Pomp und Enders ermittelten Werte, mit deren eigenen Langzeitversuchen verglichen, nicht sehr gut übereinstimmen. In den übrigen Fällen, wo keine Langzeitversuche vorliegen, sind die Werte nach dem neuen Vorschlag dreimal um 1 kg/mm², einmal um etwa 3 kg/mm² kleiner als nach dem Pomp-Endersschen Vorschlag. Dieses Ergebnis kann als eine Bestätigung des oben ermittelten Zusammenhanges zwischen Unstetigkeitspunkt und Dauerstandfestigkeit angesehen werden. Ferner findet sich auch im Schrifttum immer die bedeutsame Tatsache bestätigt, daß der Unstetigkeitspunkt bei allen Meßzeiten an der gleichen Stelle liegt.

Abb. 3. Abhängigkeit der Dehngeschwindigkeiten verschiedener Zeitabschnitte von der Belastung in doppellogarithmischer Darstellung (Werkstoff A. 400 °)

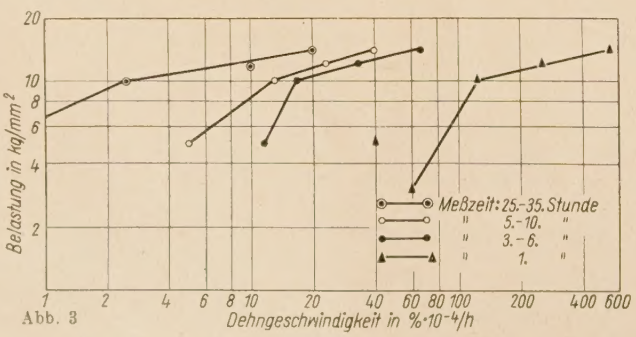

Abb. 3

Abb. 4. Auswertung von Dauerstandversuchen des Schrifttums (Versuchsergebnisse von A. Pomp und Mitarbeiter) Uebliche Darstellung der Versuchsergebnisse

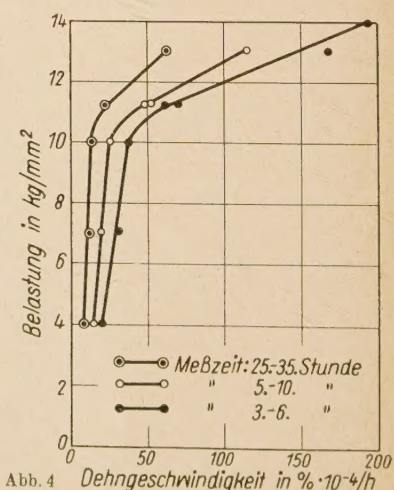

Abb. 4

Tafel 4. Auswertung von Dauerstandversuchen des Schrifttums

Werkstoff	Temperatur	Belastung am Unstetigkeitspunkt direkt abgelesen	Belastung am Unstetigkeitspunkt der logarithmisch. Darstellung entnommen	Dauerstandfestigkeit nach Langversuch	Bleibende Dehnung nach Langversuch	Dauerstandfestigkeit nach Pomp und Enders
	°C	kg/mm²	kg/mm²	kg/mm²	%	kg/mm²
A I[1]	400	≈ 9	10,5—11	10,5	—	11
A II	400	10	10 —10,5	≦ 12[4]	—	12,1
A II	500	5	5,5	5,5	—	5,3
A II	350	—	18	—	—	17,8[6]
A III	400	≈ 13	14	≦ 14,5	≈ 0,4	14,2
A III	500	—	6	6	< 0,2	6,4
A IV	400	—	≈ 12	12,5	0,32	12,4
A IV	500	≈ 4	5	5	0,16	5,2
F	400	20	19	21	0,28	21,3
F	500	10	10	10,5	0,26	10,7
G	500	16,5	16,5	—	—	17,5
J	400	30	30	31,5	1,9	32,2[6]
J	500	16	15,5	< 18	0,18	19,3[5]
C 1[2]	400	8	—	—	—	9,5
C 1	500	5,8	5,5	—	—	6,0
C 1	300	40	> 36	—	—	40[6]
C 3	400	—	≈ 12	13	0,2	15
C 3	500	≈ 8	7,5	< 9	—	9
C 4	300	37	34	—	—	39[6]
C 4	400	16	15—16	—	—	17
C 4	500	8	8	—	—	8,5
C 6	300	51	—	—	—	48—51[6]
C 6	400	16 — 17	15	≦ 16	< 0,2	20
C 6	500	10,5	10	10	—	10
Stahlguß E	500	10,5	10	—	—	11
Stahlguß G	400	18	18	—	—	18
Stahlguß G	500	11	10	—	—	10—14
Stahlguß H	400	—	≦ 9	—	—	8,5
Stahlguß R	400	≈ 30	27	—	—	30
Stahlguß R	500	13	12	—	—	11—12,5
G[3]	600	16	16	—	—	17 14 n. S. u. U.[3]

[1]) u. ff. Pomp und Höger.
[2]) u. ff. Pomp und Enders.
[3]) Siebel und Ulrich.
[4]) Wahrscheinlich etwas zu hoch.
[5]) Nach den Langversuchen dürfte dieser Wert sicher zu hoch liegen (s. Kurven).
[6]) Dauerstandfestigkeit liegt über 0,2-%-Grenze.

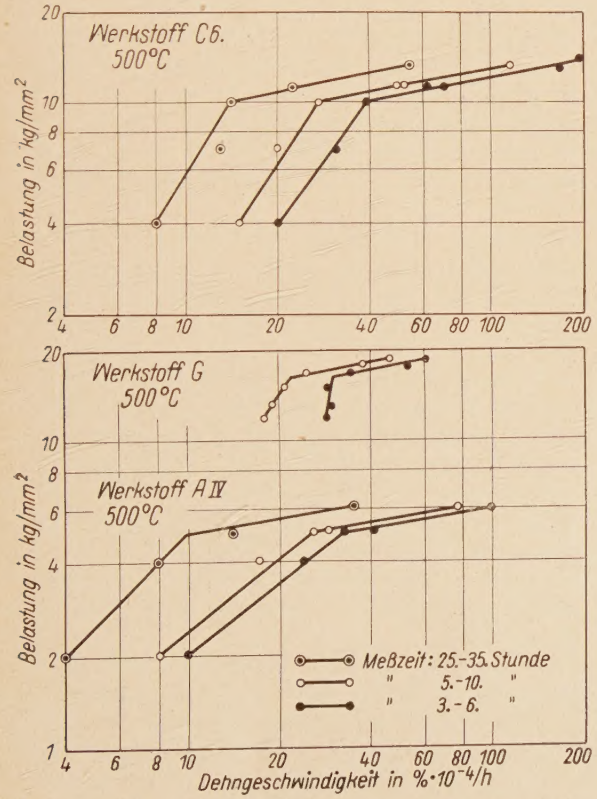

Abb. 5. Ermittlung der Belastung am Unstetigkeitspunkt durch doppellogarithmische Darstellung

Versuche mit stufenweise gesteigerter Belastung an einem Probestab

Bei sämtlichen bisherigen Versuchen, sowohl bei den eigenen wie im Schrifttum, wurde für jede Belastung stets einer neuer Probestab verwendet. Da der Ein- und Ausbau der Probestäbe eine erhebliche Erschwerung und Verteuerung der Versuche bedeutet, liegt der Gedanke nahe, die Untersuchungen an einem Probestab durch stufenweise Steigerung der Belastung durchzuführen. Gegen Untersuchungen dieser Art, die im Schrifttum vorliegen und auch von H. Juretzek[2]) in einer früheren Arbeit durchgeführt worden sind, wurden jedoch Bedenken erhoben, insbesondere als einige Forscher feststellten, daß die Versuchsbedingungen, wie Vorlast und Vorwärmdauer, den Dehnvorgang stark beeinflussen[1])[8]). Demnach kommt für Abkürzungsverfahren, die Absolutwerte der Dehngeschwindigkeit festlegen sollen, ein einziger Probestab mit stufenweiser Belastung nicht in Frage. Anders verhält es sich aber, wenn nach dem obigen Vorschlag nicht die absoluten Werte der Dehngeschwindigkeiten berücksichtigt werden, sondern ihr Verhalten in Abhängigkeit von der Belastung. Es war vielmehr zu erwarten, daß der Unstetigkeitspunkt bei der gleichen Belastung auftritt. Deshalb wurden mit den Werkstoffen A bis G Versuche mit einem einzigen Probestab angestellt. In Weiterentwicklung früherer Versuche des Verfassers wurde jetzt vor allem Wert auf gleiche Unterschiede der einzelnen Laststufen sowie auf gleiche Dauer der Lasteinwirkung gelegt, die Belastung wurde jeweils um etwa 1 kg/mm² gesteigert und für die Einwirkungsdauer jeder Stufe eine Stunde gewählt. **Abb. 6** gibt als Beispiel den mit A bei 500 ° angestellten Kurzdehnversuch. Die Dehngeschwindigkeiten der einzelnen Laststufen wurden in der Weise ermittelt, daß am Ende des jeweiligen Zeitabschnittes, z. B. bei F auf **Abb. 6**, entlastet und die bleibende Dehnung $F'F''$ festgestellt wurde. Aus der Differenz dieser bleibenden Dehnung und derjenigen der vorhergehenden Laststufe, also $F'F'' - E'E''$, ergibt sich die Zunahme der Dehnung in der betreffenden Stunde, das ist die dieser Laststufe zukommende Dehngeschwindigkeit der ersten Stunde. Es hat sich bei späteren Versuchen herausgestellt, daß der Verlauf der Teilschaulinien bei anderen Temperaturen und anderen Werkstoffen nicht immer gradlinig, d. h. also mit einer während der ganzen Stunde gleichbleibenden Geschwindigkeit wie auf **Abb. 6**, vor sich geht. Häufig tritt eine beträchtliche rasche Anfangsdehnung auf, und die Geschwindigkeit der weiteren Dehnung nimmt noch innerhalb der einen Stunde ab. In diesem Falle würde man auf die genannte Weise eine mittlere durchschnittliche Dehngeschwindigkeit je Stunde ermitteln, die geringer ist als die am Anfang der Stunde und größer als die am Ende der Stunde auftretende. Für das Gesamtergebnis ist dies aber ohne Einfluß. Das Aufzeichnen der Dehngeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Spannung auf doppellogarithmischem Papier ergibt den dargestellten Verlauf **(Abb. 7)**. Er entspricht dem Verlauf bei nur einmaliger Belastung unter Verwendung immer neuer Probestäbe, nur sind in dem ersten Teil der Geraden bis zu dem Unstetigkeitspunkt starke Streuungen vorhanden, die durch die Eigenart der logarithmischen Darstellung noch übertrieben hervorgehoben werden. Oberhalb des Unstetigkeitspunktes treten die Streuungen nicht mehr auf. In dieser Weise wurden nun mit den Stahlsorten A bis G bei 400, 500 bis 550 ° Kurzdehnversuche durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tafel 5 zusammengestellt, in

[8]) R. Mailänder, Kruppsche M., 12 (1931), S. 242/43.

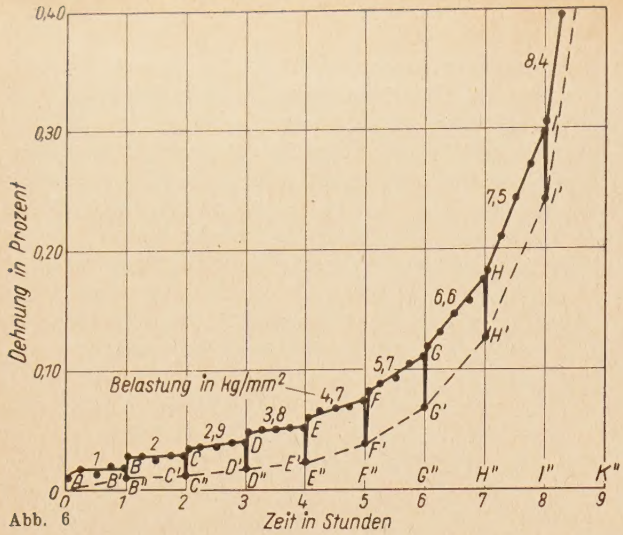

Abb. 6

Abb. 6. Versuch mit stufenweise gesteigerter Belastung an einem Probestab (Kurzdehnversuch). (Werkstoff A. 500 °)

Abb. 7. Abhängigkeit der Dehngeschwindigkeiten des Kurzdehnversuches (Abb. 6) von der Belastung in doppellogarithmischer Darstellung (Werkstoff A. 500 °)

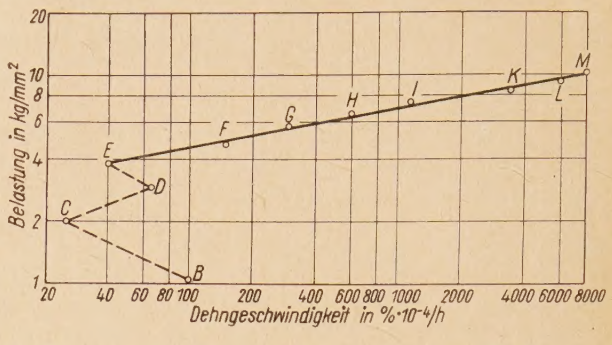

Abb. 7

der zum Vergleich auch die aus den Langzeitversuchen (Tafel 2) sich ergebenden praktischen Dauerstandfestigkeiten aufgeführt sind. Leider war es infolge der Streuungen im ersten Teil der Schaulinie bei einigen Versuchen nicht möglich, den Unstetigkeitspunkt eindeutig zu bestimmen. In diesen Fällen ist in Tafel 5 nur der oberste Grenzwert angeführt. Im allgemeinen ist eine Uebereinstimmung zwischen den Ergebnissen der beiden Versuchsarten vorhanden, indem Langdehnversuche mit Belastungen unterhalb des in den Kurzdehnversuchen ermittelten Grenzwertes auch tatsächlich den für die praktische Dauerstandfestigkeit festgesetzten Bedingungen entsprechen, während sie mit Belastungen oberhalb dieses Wertes das Ueberschreiten der Dauerstandfestigkeit erkennen lassen. Nicht im Einklang stehen die Ergebnisse von B bei 400 ° und von G bei 500 °, ferner von A, B und C bei 550 °. Letztere Erscheinung scheint in dem Verlauf der Zeitdehnungslinien bei 550 ° begründet zu sein, indem der langsame, fast gradlinige Anstieg auch unter sehr geringen Belastungen auf besondere Vorgänge bei diesen Temperaturen schließen läßt (Gefügeänderungen). In einem solchen Falle müssen abgekürzte Versuche naturgemäß versagen, indem anfänglich immer eine große Widerstandsfähigkeit festgestellt wird, die erst im Laufe der Zeit verloren geht.

Unbefriedigend ist allerdings bei den Kurzdehnversuchen, daß infolge der starken Streuungen in dem ersten Bereich der Linien der Unstetigkeitspunkt nicht eindeutig zu ermitteln war. Vor allem mußte daher festgestellt werden, ob dies auf zufällige Versuchsungenauigkeiten zurückzuführen oder in der Natur des Kurzdehnversuches begründet ist. Zu diesem Zweck wurden in derselben Weise Versuche mit einem neuen Werkstoff auf der gänzlich anders beschaffenen Dauerstandfestigkeitsapparatur des Lehrstuhls für Metallkunde an der Technischen Hochschule Breslau durchgeführt. Diese Einrichtung besitzt eine optische Schreibvorrichtung und einen auf 1° genauen Temperaturregler[9]). Der Werkstoff (H) war ein weicher Stahl von 0,09 % Kohlenstoff und etwa 0,5 % Mangan. Es wurde zunächst ein Kurzdehnversuch genau in der beschriebenen Weise durchgeführt. Das Ergebnis gibt **Abb.** 8. Die Streuungen sind sehr gering, und daher ist der Unstetigkeitspunkt mit guter Genauigkeit zu ermitteln (9,2 kg/mm²). Nach **Abb.** 8 sind aus den photographisch aufgezeichneten Dehnungsschaulinien zwei Dehngeschwindigkeiten ermittelt worden, einmal für die durchschnittliche Dehngeschwindigkeit je Stunde und außerdem für die am Ende der Stunde tatsächlich vorhandene Dehngeschwindigkeit, das heißt die Verlängerung, wenn die am Ende der Stunde vorhandene Dehngeschwindigkeit eine Stunde konstant bliebe. Dieser Betrag wurde ermittelt, indem Tangenten in den Endpunkten an die Dehnungsteilschaulinien gelegt wurden.

Erfahrungsgemäß erfolgt die rasche Abnahme der Dehngeschwindigkeit vor allem innerhalb der ersten Stunde, während sie später wenigstens innerhalb einer Stunde ungefähr konstant bleibt, so daß die Schaulinien in diesen Teilen Gerade bilden und eine genaue Ermittlung der Dehngeschwindigkeit gewährleistet ist. Daher wurde noch ein zweiter Versuch angestellt, bei dem aber der Stab den einzelnen Laststufen sechs Stunden lang ausgesetzt blieb **(Abb. 9).** Das Ergebnis stimmt mit dem des ersten Versuches gut überein, indem hier bei allen Meßzeiten der Unstetigkeitspunkt bei gleichfalls etwa 9 kg/mm² auftritt. Dieses Ergebnis der Kurzdehnversuche wurde dann durch Langdehnversuche, über die später von F. Sauerwald und C. Appaly berichtet wird, bestätigt gefunden.

Als Gesamtergebnis aller Versuche mit stufenweise gesteigerter Belastung nur eines Probestabes gilt, daß auch dieses Stufenverfahren für die Ermittlung der nach dem neuen Vorschlag definierten Dauerstandfestigkeit brauchbar ist.

Tafel 5. Ergebnisse der Kurzdehnversuche (stufenweise Belastungssteigerung an einem Probestab) und Dauerstandfestigkeiten

Werkstoff	Temperatur °C	Belastung am Unstetigkeitspunkt kg/mm²	Dauerstandfestigk. aus Langversuch kg/mm²
A	400	≷ 10,5	10,5
A	500	≷ 3,6	3,6
A	550	≷ 3	< 2
B	400	7	9,5
B	500	≷ 3,5	3,2
B	550	4,3	< 2
C	400	≷ 13	13
C	500	7	7
C	550	4	≷ 3
D	500	≷ 13	≷ 12
D	550	7,5	6
E	550	9	9
F	400	≷ 10	10
F	500	7	8
F	550	4	4
G	400	12,5	< 13
G	500	9,5	8
G	550	5	5
H	400	9	7,9—10: ~ 9

[9]) Eine nähere Beschreibung dieser Einrichtung folgt in einem Bericht von F. Sauerwald und C. Appaly.

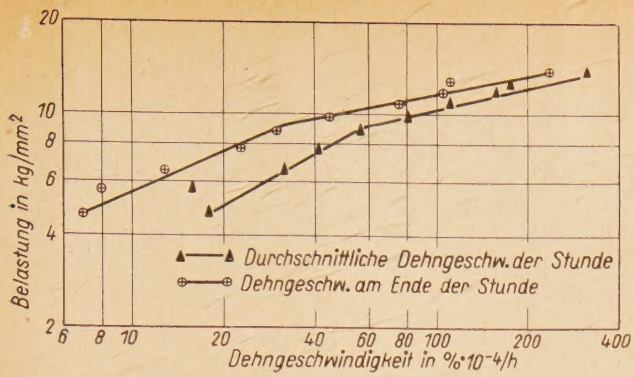

Abb. 8

Abb. 8. Ergebnisse des Kurzdehnversuchs mit Werkstoff H bei 400 °

Abb. 9. Ergebnisse des Kurzdehnversuchs bei jeweils sechsstündiger Belastungsdauer (Werkstoff H. 400 °)

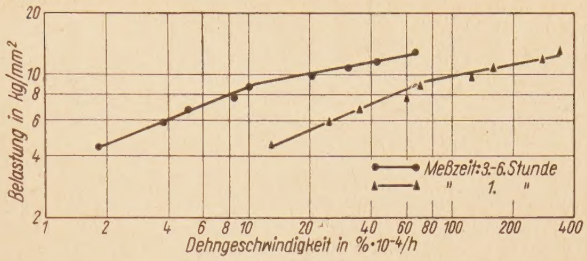

Abb. 9

Zusammenfassung

Mit sieben Baustahlsorten, den Blechsorten I bis III der Werkstoff- und Bauvorschriften für Landdampfkessel, zwei Sonderstählen und zwei Stahlgußsorten mit verschiedenem Kohlenstoffgehalt werden Dauerstandversuche von mehreren hundert Stunden bei 400, 500 und 550 ° angestellt. Nach den Ergebnissen wird der Vorschlag einer neuen, an den physikalischen Vorgang anknüpfenden Begriffsfestsetzung der Dauerstandfestigkeit gemacht, dessen Berechtigung an Hand der eigenen Versuchsergebnisse und der des Schrifttums nachgewiesen wird. Das Ermittlungsverfahren der Dauerstandfestigkeit wird weiterhin vereinfacht, indem nach dem neuen Vorschlag Versuche mit stufenweise gesteigerter Belastung e i n e s einzigen Probestabes durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden mit denen der Langdehnversuche verglichen und als übereinstimmend festgestellt. Das Verfahren wird auf einer anders beschaffenen Dauerstandfestigkeitsapparatur und an einem neuen Werkstoff nachgeprüft und seine Brauchbarkeit bestätigt.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545806_0053

LEBENSLAUF

Am 25. August 1901 wurde ich in Kochlowitz, Kreis Kattowitz, als Sohn des Lehrers Karl Juretzek, der im Weltkrieg 1917 den Heldentod starb, geboren. Ich besuchte die dortige Volksschule und vom Jahre 1912 bis 1921 das humanistische Gymnasium in Königshütte. Nach der Reifeprüfung arbeitete ich praktisch in den Hüttenwerken der Kattowitzer A.-G. für Bergbau und Eisenhüttenbetrieb. Im Sommersemester 1922 begann ich das Studium der Eisenhüttenkunde an der Technischen Hochschule in Breslau und legte hier im November 1927 die Diplom-Hauptprüfung ab.

Am 1. Januar 1928 trat ich in die Dienste der früheren Borsigwerk A.-G. In deren Versuchsanstalt war ich als Leiter der metallographischen Abteilung bis zur Stillegung des gesamten Hüttenwerkes am 31. März 1932 tätig. Ich widmete mich dann der Vervollständigung der vorliegenden Arbeit.

Druck: Buch- und Tiefdruck-Gesellschaft mbH., Berlin SW 19, Schützenstr. 18–25.